干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1961—2017年北疆初终霜日及霜期时空变化特征

张 鑫[1]， 楼俊伟[2]， 王 勇[3]， 王智楷[4]

（1. 石河子气象局莫索湾气象站，新疆 石河子 832000；2. 浙江省金华市武义县气象局，浙江 武义 321200；
3. 新疆生态气象与卫星遥感中心，新疆 乌鲁木齐 830000；4. 四川省德阳市气象局，四川 德阳 618000）

摘 要： 利用1961—2017年北疆37个地面气象站逐日最低气温观测资料，结合常规气象统计方法，分析北疆地区初、终霜日和霜期的时空演变特征。结果表明：（1）北疆平均初霜日以2.2 d·(10a)$^{-1}$速率推迟；平均终霜日以1.7 d·(10a)$^{-1}$速率提前；平均霜期以3.9 d·(10a)$^{-1}$速率缩短；初、终霜日和霜期的主周期均为2 a左右。（2）北疆霜期缩短趋势较大（小）的地区，能较好的对应其初霜日推迟、终霜日提前较强（弱），伊犁州、塔城地区北部及东天山东北部霜期的缩短趋势最为显著，博州至天山北坡一线居中，阿勒泰地区霜期的缩短趋势最弱。（3）北疆大部分地区初霜日的变化趋势与海拔高度有很好的相关性，其初霜日的推迟速度随海拔高度的增加而减小，垂直递减率为−0.077 d·(a·km)$^{-1}$；秋季气候变暖是初霜日推迟的主要原因，春、秋季气候变暖同时影响霜期缩短，且秋季的影响更大。

关 键 词： 初、终霜日；霜期；时空变化；北疆

文章编号：

霜冻是中高纬度地区影响农业生产的主要灾害之一，无霜期则是衡量一个地区热量资源多寡的重要指标之一[1]。农业生产中将入秋以来地面温度第一次和最后一次低于0 ℃的日期称为初霜日和终霜日，自初霜日到终霜日之间的天数称为霜期[2]，但地面温度较难获取，通常用日最低气温代替[3]。近年来在全球气候变暖背景下，初、终霜日和霜期变化的研究受到了国内外学者的广泛关注[4-10]，且气候变暖在一定程度上对初、终霜日和霜期的长短产生影响[11-15]。宁晓菊等[3]统计分析1951年以来全国无霜期变化特点表明，中国80%以上区域呈现初霜日推后、终霜日提前和无霜期延长趋势；韩荣青等[4]研究我国北方初霜期变化情况表明，2000年以来北方各地初霜期推迟最为明显，且黑龙江东部地区推迟到了9月30日以后；李辑等[12]分析1957年以来辽宁省初终霜期气候变化特征指出，50 a内辽宁省初霜期推迟近10 d，终霜期提前约17 d，无霜期日数增加约26 d。陈少勇、李硕等[16-17]指出气候变暖背景下，西北地区初霜日平均以1.8 d·(10a)$^{-1}$的速率推迟，并在1986年出现明显的突变。

新疆地处亚欧大陆腹地，春、秋季冷空气活动频繁，气温波动大，霜冻会造成春播作物冻害死亡或秋收作物不能正常成熟，生命期缩短而影响产量、品质等[18]。无霜期日数是新疆重要的农业气候指标之一，大多数农作物的生长发育成熟与它关系密切[19]。将初、终霜日与霜期三者结合起来分析，可以更清楚地认识其变化特征，对预防霜冻危害具有很好的参考意义。虽然已有学者对新疆无霜期变化特征做过研究，但针对北疆地区将三者结合进行研究的鲜有见刊。潘淑坤等[20]对1960—2011年新疆（北疆选取20个气象站点）初终霜日及无霜期进行区域平均研究表明，新疆平均初霜日推迟了11 d，平均终霜日提前了7 d，平均无霜期延长了17 d。由于新疆地域辽阔，具有“三山夹两盆”的地理特

收稿日期： 2019-11-18； **修订日期：** 2020-09-24
基金项目： 新疆科技援疆计划（2019E0208）资助
作者简介： 张鑫（1995-），男，汉族，助理工程师，现从事大气科学研究工作. E-mail: 40468607@qq.com
通讯作者： 王勇（1968-），男，汉族，正高级工程师，主要从事气象卫星及遥感应用研究. E-mail: 443409880@qq.com

点，且南北疆气候差异明显，因此，有必要利用更多具有代表性的站点数据，对北疆初、终霜日及霜期的时空变化特征进行分析研究。为此，本文利用1961—2017年北疆具有农区代表性的37个气象站点资料，较全面的分析北疆地区初、终霜日及霜期的时空变化特征，为北疆地区预防霜冻灾害，指导农业生产提供参考。

1　数据来源与研究方法

1.1　数据来源

利用新疆气象信息中心审核通过的1961—2017年北疆37个地面气象站（图1）逐日最低气温观测资料，选取每年入秋以来第一次和最后一次日最低气温低于0 ℃的日期判定为当年的初霜日及终霜日，重点分析平原及盆地区域的初、终霜日及霜期的时空变化特征。

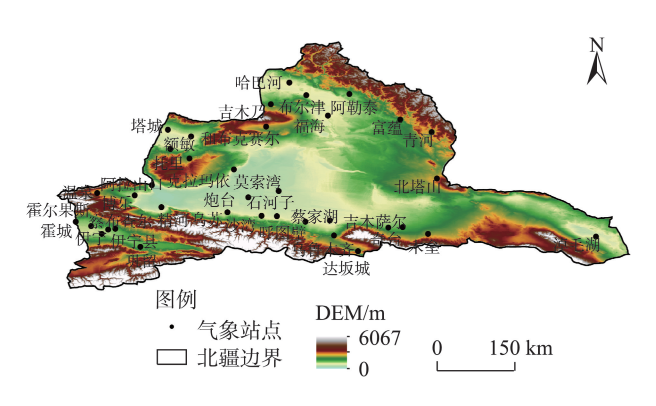


图1　北疆地形及37个气象站点分布示意图

Fig. 1　Distribution of research area and meteorological site

1.2　研究方法

为了便于分析，把北疆37个站点的初、终霜日及霜期数据进行区域平均，并将公历下的初、终霜日转换为用儒略历[21]定义，方法为1月1日定为1，1月2日定为2，以此类推，随之顺序增加。

利用一元线性回归方程（$y=kx+b$），建立回归方程及滑动变化趋势线（取11 a滑动平均），分析北疆初、终霜日和霜期的年际变化趋势。利用M-K突变检验法[22]分析北疆初、终霜日和霜期的时间趋势变化程度及突变情况。同时，利用Morlet小波变换方法[22]对初、终霜日和霜期变化的周期性进行研究。

利用样条函数[23]插值法，将北疆37个站点数据通过分位数法分别插值为精度3 km×3 km的格点数据，直观反映空间变化情况。

2　初、终霜日和霜期的时间变化特征

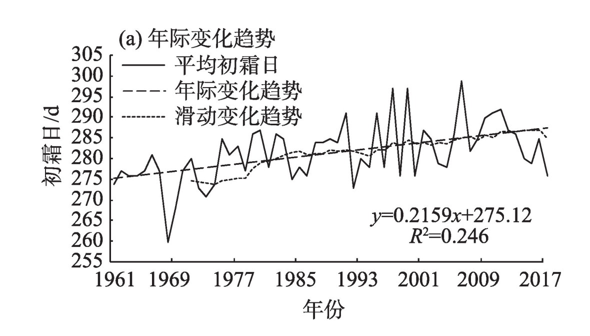
2.1　初霜日的时间变化特征

2.1.1　初霜日的时间变化趋势　通过1961—2017年北疆平均初霜日的年际变化趋势可以看出（图2a），北疆平均初霜日总体呈推迟趋势，推迟速率为2.2 d·(10a)$^{-1}$（通过99.9%显著性检验）。滑动趋势线可见，1971—1973年、1991—1994年北疆平均初霜日呈提前趋势，1994—2016年呈较小波动的持续推迟趋势。平均初霜日最晚为当年第299日，出现在2006年10月26日；平均初霜日最早为当年第260日，出现在1968年9月17日。平均初霜日最早和最晚的年份之间相差39 d。

2.1.2　初霜日的M-K突变检验　1961—2017年北疆平均初霜日的M-K突变检验表明（图2b），北疆平均初霜日主要呈增长趋势，说明北疆初霜日在推迟，并在1974—1975年存在一次突变，而1978—2017年超过0.05显著性水平的信度线，说明近40 a北疆初霜日的推迟趋势尤其明显。

2.2　终霜日的时间变化特征

2.2.1　终霜日的时间变化趋势　1961—2017年北疆平均终霜日的年际变化趋势可以看出（图3a），北疆



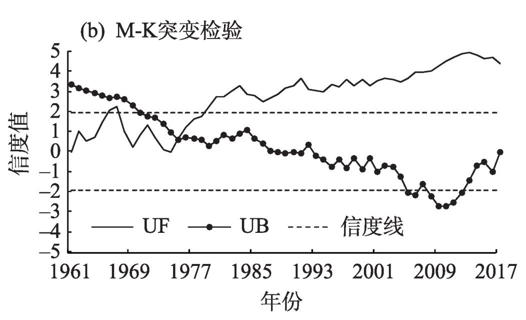


图2　1961—2017年北疆平均初霜日的年际变化趋势和M-K突变检验

Fig. 2　Interannual trends of the average first frost day and M-K mutation test diagram from 1961 to 2017 in northern Xinjiang

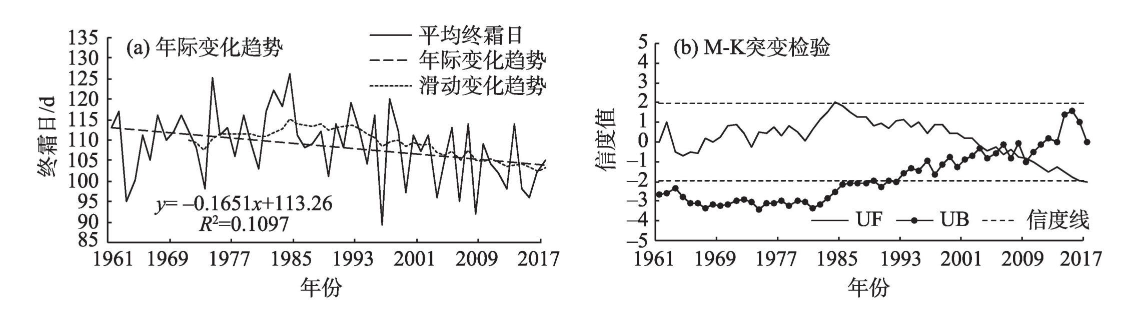


图3　1961—2017年北疆平均终霜日的年际变化趋势和M-K突变检验

Fig. 3　Interannual trends of the average final frost day and M-K mutation test diagram from 1961 to 2017 in northern Xinjiang

平均终霜日随着年份的增加而提前，提前速率为1.7 d·(10a)$^{-1}$（通过99%显著性检验）；滑动趋势线1973—1977年、1980—1984年、1989—1992年呈推迟趋势，1997—2017年呈较小波动的持续提前趋势。平均终霜日最晚为当年第126日，出现在1984年5月5日；平均终霜日最早为当年第89日，出现在1996年3月29日。平均终霜日最早和最晚的年份之间相差37 d之久。

2.2.2　终霜日的M-K突变检验　1961—2017年北疆平均终霜日的M-K突变检验可以看出（图3b），北疆平均终霜日在1963—1967年、2003—2017年呈减小趋势，即北疆这段时期终霜日在提前，并在2005—2009年发生突变。

2.3　霜期的时间变化特征

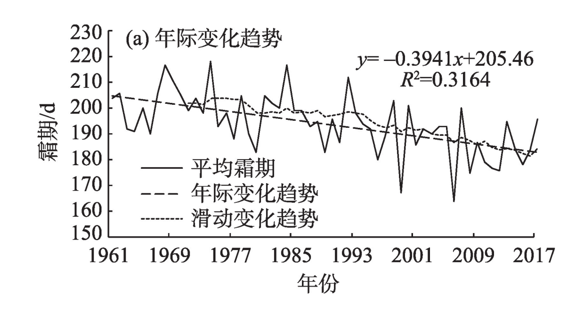
2.3.1　霜期的时间变化趋势　1961—2017年北疆平均霜期的年际变化趋势可见（图4a），北疆平均霜期随着年份的增加而缩短，缩短速率为3.9 d·(10a)$^{-1}$（通过99.9%显著性检验）；滑动趋势线20世纪70、90年代初期北疆平均霜期呈延长趋势，1998—2016年呈较小波动的持续缩短趋势。平均霜期天数最多有218 d，出现在1974年；平均霜期天数最少仅有164 d，出现在2006年。平均霜期天数最多和最少的年份之间相差54 d之多。

2.3.2　霜期的M-K突变检验　1961—2017年北疆平均霜期的M-K突变检验可以看出（图4b），北疆平均霜期在1963—1967年、1976—2017年呈减小趋势，说明这段时期北疆霜期在缩短。在1993—1994年存在一次突变，之后开始出现明显的缩短趋势，并在1996—2017年超过0.05显著性水平的信度线，说明近20 a北疆霜期具有十分显著的缩短趋势。

2.4　霜的周期变化特征

2.4.1　初霜日的周期变化特征　1961—2017年北疆初霜日Morlet小波能量谱分布表明（图5a），北疆初霜日通过95%显著性检验的频域和时间域聚集中心主要有3个，中心坐标分别为(5, 1972)、(3, 1983)、(2, 2001)，每个坐标为中心的小波能量在时域尺度上的强集中影响范围分别为1965—1978年、1980—1985年和1990—2010年。由时间平均功率谱可知，初霜日分别存在2 a、4 a、18 a左右的周期，其中2 a、4 a左右的振荡周期通过了95%显著性检验，且初霜日的主周期为2 a左右。

2.4.2　终霜日的周期变化特征　1961—2017年北疆终霜日Morlet小波能量谱分布表明（图5b），北疆终霜日通过95%显著性检验的频域和时间域聚集中心主要有4个，中心坐标分别为(3, 1963)、(4, 1975)、(3, 1998)、(3, 2007)，每个坐标为中心的小



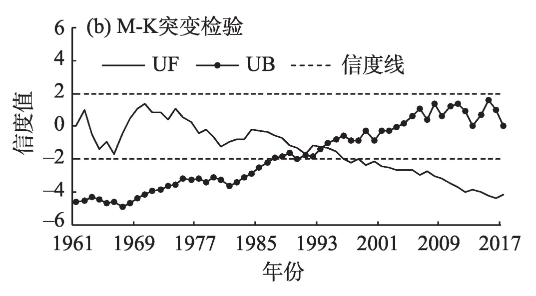
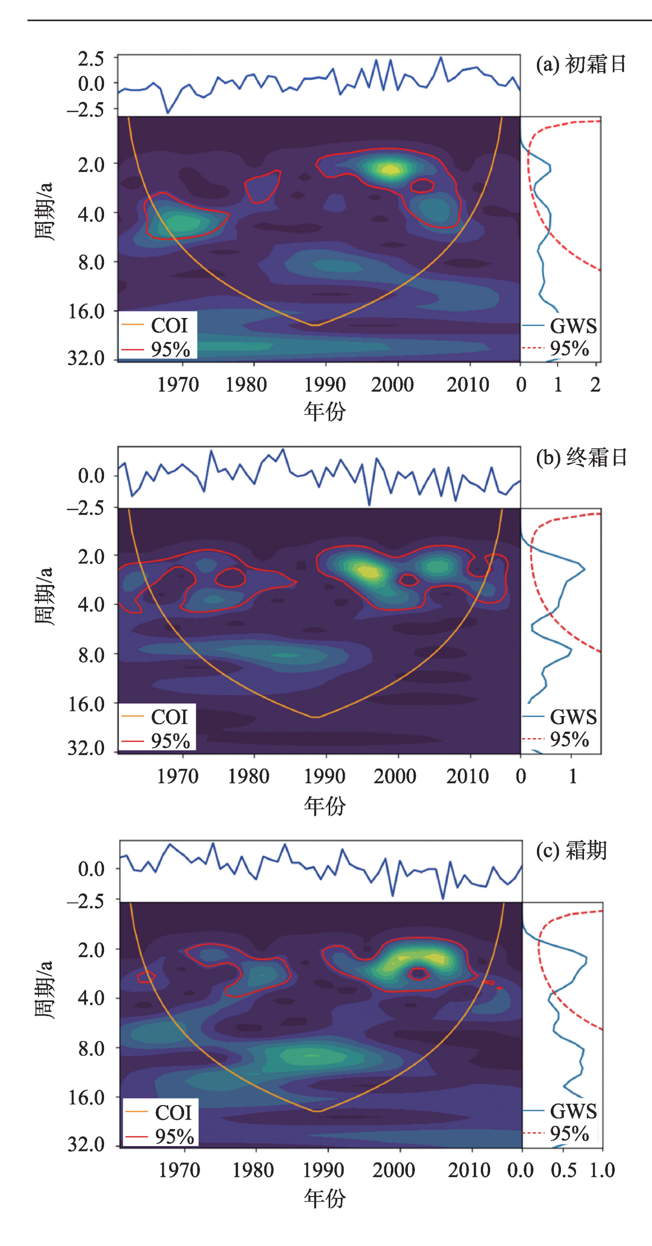


图4　1961—2017年北疆平均霜期的年际变化趋势和M-K突变检验

Fig. 4　Interannual trends of the average frost period and M-K mutation test diagram from 1961 to 2017 in northern Xinjiang



注：COI为影响锥；GWS为小波功率谱。

图5　1961—2017年北疆初霜日、终霜日及霜期Morlet小波能量谱分布

Fig. 5　Morlet wavelet energy spectrums of time coefficients from 1961 to 2017 in northern Xinjiang

波能量在时域尺度上的强集中影响范围分别为1961—1970年、1971—1987年、1990—2002年和2003—2016年。由时间平均功率谱可知，终霜日存在2 a、8 a左右的周期，其中2 a左右的振荡周期通过了95%显著性检验，且终霜日的主周期为2 a左右。

2.4.3　霜期的周期变化特征　1961—2017年北疆霜期Morlet小波能量谱分布表明(图5c)，北疆霜期通过95%显著性检验的频域和时间域聚集中心主要有2个，中心坐标分别为(3，1982)、(2，2007)，每个坐标为中心的小波能量在时域尺度上的强集中影响范围分别为1970—1985年和1990—2010年。由时间平均功率谱可知，霜期存在2 a、8 a、16 a左右的周期，其中2 a左右的振荡周期通过了95%显著性检验，且霜期的主周期为2 a左右。

3　初、终霜日和霜期的空间变化特征

3.1　初霜日的空间变化

1961—2017年北疆初霜日空间变化趋势可以看出(图6a)，北疆初霜日变化倾向率整体为增加趋势，变化趋势介于0.06~0.48 $d\cdot a^{-1}$之间，说明1961—2017年以来北疆初霜日整体在推迟。其中，初霜日变化倾向率伊犁河谷自北向南变化梯度较大，在0.06~0.48 $d\cdot a^{-1}$之间，即推迟趋势在增大；博州自北向南变化较缓，在0.36~0.18 $d\cdot a^{-1}$之间，即推迟趋势在减小；塔城地区北部自北向南在0.18~0.30 $d\cdot a^{-1}$之间，推迟趋势在增大；阿勒泰地区除青河外，大部地区初霜日在0.06~0.18 $d\cdot a^{-1}$之间，推迟趋势较小；石河子市莫索湾北部沙漠地带达0.36 $d\cdot a^{-1}$以上，推迟趋势明显；天山北坡集中在0.06~0.24 $d\cdot a^{-1}$之间，为推迟趋势；东天山北部在0.24~0.36 $d\cdot a^{-1}$之间，推迟趋势较大。综上所述，初霜日博州、塔城地区北部、准噶尔盆地南缘、东天山北部等地推迟速度最快，每10 a将推迟4 d左右。

3.2　终霜日的空间变化

1961—2017年北疆终霜日空间变化趋势可以看出(图6b)，北疆终霜日变化倾向率介于−0.56~0.08 $d\cdot a^{-1}$之间，说明近57 a来北疆大部分地区终霜日在提前，部分地区终霜日在微弱推迟。其中，终霜日变化倾向率伊犁河谷自北向南在−0.08~−0.40 $d\cdot a^{-1}$之间，提前趋势在增大；博州中东部为−0.16 $d\cdot a^{-1}$，提前趋势较一致；塔城地区北部在−0.32~−0.40 $d\cdot a^{-1}$之间，提前趋势较大；阿勒泰地区除福海县为−0.32 $d\cdot a^{-1}$提前趋势较大外，其他大部区域提前趋势较小，但阿勒泰市为0.07 $d\cdot a^{-1}$，为推迟趋势；天山北坡一线自北向南在−0.16~0.0 $d\cdot a^{-1}$之间，及提前趋势在减小；东天山北部自西向东在0.08~−0.32 $d\cdot a^{-1}$之间，即提前趋势在增大，而北塔山为0.06 $d\cdot a^{-1}$，为推迟趋势。因此，终霜日伊犁州、塔城地区北部、东天山东北部提前趋势较大，博州至天山北坡一线提前趋势较小。

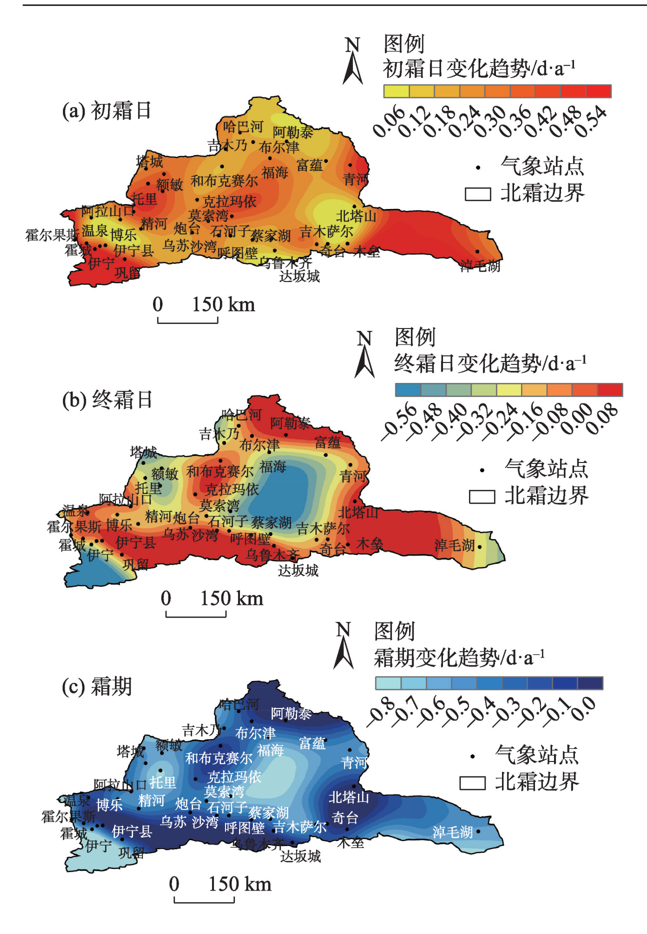


图6 1961—2017年北疆初霜日、终霜日及霜期的空间变化趋势示意图

Fig. 6 Spatial variation map from 1961 to 2017 in northern Xinjiang

3.3 霜期的空间变化

1961—2017年北疆霜期空间变化趋势可以看出(图6c),北疆霜期变化倾向率介于-0.8~0.0 d·a^{-1}之间,整体为减少趋势,说明1961—2017年北疆霜期整体在缩短。霜期变化倾向率伊犁河谷霍尔果斯市达-0.7 d·a^{-1},即缩短趋势最大,伊宁县为-0.19 d·a^{-1},缩短趋势最小,霍城县、伊宁市、巩留县霜期变化趋势接近,均为每10 a延长3~4 d;塔城地区北部在-0.5~-0.7 d·a^{-1}之间,缩短趋势较大;博州在-0.4~-0.5 d·a^{-1}之间,缩短趋势一致;阿勒泰地区自北向南在0.0~-0.5 d·a^{-1}之间,缩短趋势增大;天山北坡一线集中在-0.2~-0.3 d·a^{-1}之间,缩短趋势较一致;东天山北部自西向东逐渐减小,缩短趋势在增大,淖毛湖达-0.63 d·a^{-1}。

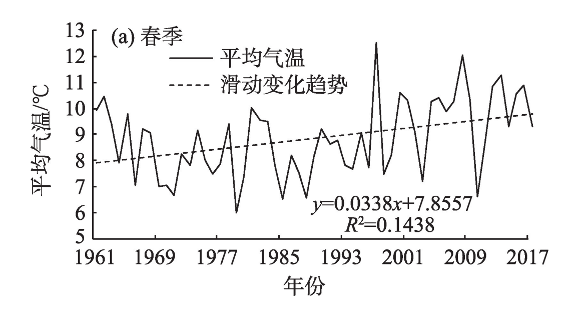
综上所述,北疆霜期缩短趋势较大的地区,能较好的对应其初霜日推迟、终霜日提前较强,北疆霜期缩短趋势较小的地区,能较好的对应其初霜日推迟、终霜日提前较弱,这与许艳、王国复等[24-25]研究结果一致。北疆霜期的变化趋势受地形影响较大,伊犁州、塔城地区北部及东天山东北部缩短趋势最为显著,博州至天山北坡一线居中,阿勒泰地区霜期的缩短趋势最弱。

4 气候变化及海拔高度对初、终霜日和无霜期的影响

4.1 春、秋季平均气温的影响

1961—2017年北疆春、秋季平均气温变化趋势可以看出(图7),北疆春季变暖速率为0.03 d·a^{-1}(图7a),秋季为0.04 d·a^{-1}(图7b),春、秋季变暖速率相差不大。北疆初、终霜日及霜期与春、秋季平均气温的拟合表明(图8),初霜日随秋季气温的升高而明显推迟(图8a),秋季气温每升高1 ℃,初霜日约推迟3.3 d;终霜日与春季平均气温的线性关系置信水平不高(图8b);霜期随秋季气温的升高而显著缩短(图8c),秋季气温每升高1 ℃,霜期约缩短5.0 d;霜期随春季气温的升高而缩短(图8d),春季气温每升高1 ℃,霜期约缩短1.0 d。

可见,秋季气候变暖是初霜日推迟的主要原因,春、秋季气候变暖同时影响霜期缩短,且秋季变暖的影响明显大于春季,这可能是导致北疆初霜日



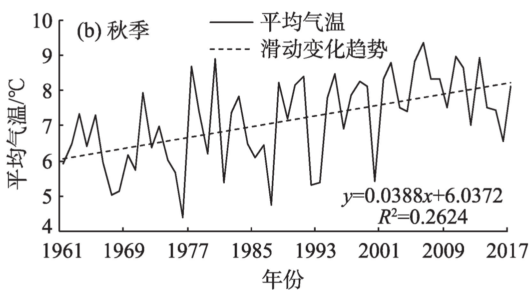


图7 1961—2017年北疆春、秋季平均气温变化趋势

Fig. 7 Average temperature variation trend of spring and autumn from 1961 to 2017 in northern Xinjiang

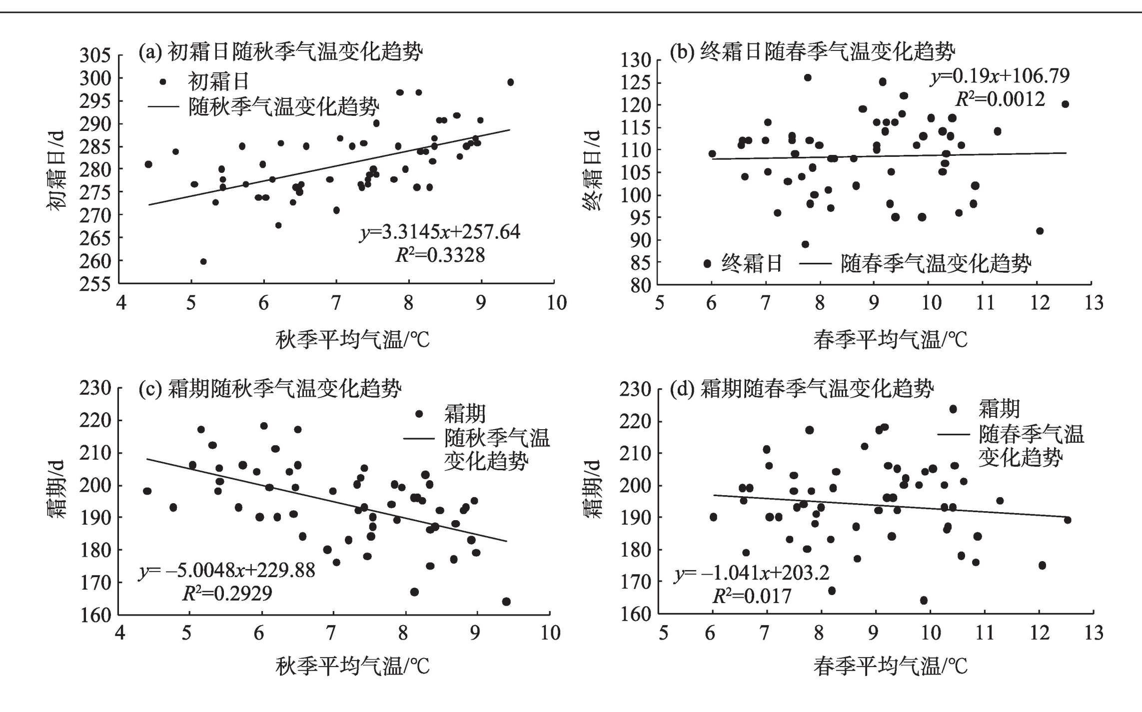


图8　1961—2017年北疆初霜日、终霜日及霜期与春、秋季平均气温的拟合

Fig. 8　The first frost day, the last frost day and the frost period in northern Xinjiang were fitted with the average temperature in spring and autumn from 1961 to 2017

推迟速率高于终霜日提前速率的原因。

4.2　海拔高度的影响

为了研究北疆初、终霜日和霜期的时间变化趋势与海拔高度的对应关系，且保证结论的准确性，本文挑取第2节初、终霜日和霜期的时间变化图，通过显著性检验的站点来定量分析其与海拔高度的关系。分析结果表明，终霜日和霜期的时间变化趋势与海拔高度的线性关系置信水平不高，故只在此讨论初霜日的时间变化趋势与海拔高度的关系。

北疆初霜日的时间变化趋势与海拔高度的拟合表明(图9)，北疆37个站点中有33个站点通过了初霜日随时间变化的显著性检验，且海拔高度介于300~1700 m之间，各站点初霜日的时间变化趋势随海拔高度的增加而减小，即初霜日的推迟速度随海拔高度的增加而减小，垂直递减率为−0.077 d·(a·km)$^{-1}$(通过90%的显著性检验)，此结论与潘淑坤等[20]、张音等[26]研究结果相一致。

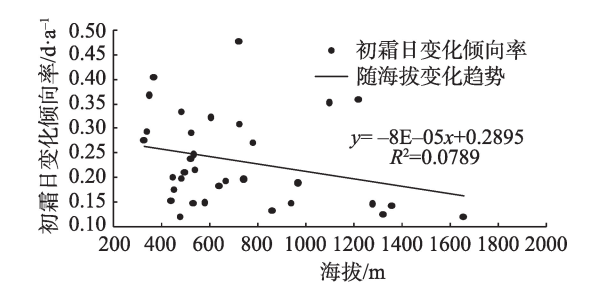


图9　1961—2017年北疆初霜日的时间变化趋势与海拔高度的拟合

Fig. 9　Time variation trend of the first frost days in northern Xinjiang from 1961 to 2017 was fitted with the altitude

分析表明北疆霜期缩短与初霜日推迟呈显著的负相关，相关系数为−0.74，与终霜日提前则呈显著的正相关，相关系数为0.76(图略)。由此可见，霜期的缩短是初霜日推迟和终霜日提前共同作用的结果，且后者的贡献稍大些。

5　结 论

本文利用1961—2017年北疆37个站点的逐日最低气温数据对其初、终霜日和霜期的时空变化特征及初霜日的时间变化趋势与海拔高度的关系进行分析，得出以下结论：

(1) 北疆平均初霜日随着年份的增加而推迟，推迟速率为2.2 d·(10a)$^{-1}$，并在1974—1975年存在一次突变，且1978—2017年北疆初霜日的推迟趋势是尤其明显的；平均终霜日随年份的增加而提前，提前速率为1.7 d·(10a)$^{-1}$，1963—1967、2003—2017年北疆终霜日在提前，并在2005—2009年发生突变；平均霜期随年份的增加而缩短，缩短速率为3.9

d·(10a)$^{-1}$，并在1993—1994年存在一次突变，且1996—2017年北疆霜期具有十分显著的缩短趋势。初、终霜日和霜期均存在2 a左右的主变化周期。

（2）北疆霜期缩短趋势较大的地区，能较好的对应其初霜日推迟、终霜日提前较强，北疆霜期缩短趋势较小的地区，能较好的对应其初霜日推迟、终霜日提前较弱。北疆霜期的缩短趋势受地形影响较大，伊犁州、塔城地区北部、东天山东北部缩短趋势最为显著，缩短趋势在-0.5~-0.7 d·a^{-1}之间，博州至天山北坡一线缩短趋势居中，每10 a将延长2~4 d，阿勒泰北部地区缩短趋势最弱，多在-0.2 d·a^{-1}以下。

（3）北疆大部分地区初霜日的时间变化趋势与海拔高度有很好的相关性（通过90%的显著性检验），其初霜日的推迟速度随海拔高度的增加而减小，垂直递减率为-0.077 d·(a·km)$^{-1}$。秋季气候变暖是初霜日推迟的主要原因，春、秋季气候变暖同时影响霜期缩短，且秋季的影响更大。

参考文献（References）

[1] 张山清, 普宗朝, 李景林, 等. 气候变暖背景下新疆无霜冻期时空变化分析[J]. 资源科学, 2013, 35(9): 1908-1916. [Zhang Shanqing, Pu Zongchao, Li Jinglin, et al. Analysis of spatiotemporal changes in Xinjiang during the frost-free season under the background of climate warming[J]. Resources Science, 2013, 35(9): 1908-1916.]

[2] 李世奎. 中国农业气候资源和农业气候区划[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 56-58. [Li Shikui. Agroclimatic resources and agroclimatic regionalization in China[M]. Beijing: Science Press, 1988: 56-58.]

[3] 宁晓菊, 张丽君, 杨群涛, 等. 1951年以来中国无霜期的变化趋势[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1812-1813. [Ning Xiaoju, Zhang Lijun, Yang Quntao, et al. Trend of frost-free period in China since 1951[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(11): 1812-1813.]

[4] 韩荣青, 李维京, 艾婉秀, 等. 中国北方初霜冻日期变化及其对农业的影响[J]. 地理学报, 2010, 65(5): 525-532. [Han Rongqing, Li Weijing, Ai Wanxiu, et al. Change in date of the first frost in northern China and its impact on agriculture[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(5): 525-532.]

[5] 焦文慧, 张勃, 马彬, 等. 近58 a中国北方地区极端气温时空变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(5): 1220-1230. [Jiao Wenhui, Zhang Bo, Ma Bin, et al. Temporal and spatial changes of extreme temperature and its influencing factors in northern China in recent 58 years[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(5): 1220-1230.]

[6] 冯克鹏, 田军仓, 沈晖. 基于K-means聚类分区的西北地区近半个世纪气温变化特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(6): 1239-1252. [Feng Kepeng, Tian Juncang, Shen Hui. Temperature variation characteristics of northwest China based on K-means clustering partition in the past half century[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(6): 1239-1252.]

[7] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1456-1466. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1456-1466.]

[8] Meehl G A, Tebaldi C, Nychka D. Changes in frost days in simulations of twenty first century climate[J]. Climate Dynamics, 2004, 23: 495-511.

[9] Easterling D R. Recent changes in frost days and the frostfree season in the United States[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002, 83(9): 1327-1332.

[10] 香薇, 程志刚, 周波涛, 等. 1975—2016年秦巴山区极端气温事件的空间差异性分析[J]. 气候变化研究进展, 2018, 7(4): 362-370. [Xiang Wei, Cheng Zhigang, Zhou Botao, et al. Spatial difference analysis of extreme temperature events in Qinba Mountain area from 1975 to 2016[J]. Advances in Climate Change Research, 2018, 7(4): 362-370.]

[11] 蔡福, 明惠青, 纪瑞鹏, 等. 辽宁地区近50年无霜期时空演变特征[J]. 中国农业气象, 2010, 31(2): 188-193. [Cai Fu, Ming Huiqing, Ji Ruipeng, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of frost-free period in the past 50 years in Liaoning[J]. Chinese Agricultural Meteorology, 2010, 31(2): 188-193.]

[12] 李辑, 严晓瑜, 王颖. 辽宁省近50年霜的气候变化特征[J]. 气象, 2011, 36(11): 38-45. [Li Ji, Yan Xiaoyu, Wang Ying. Climate change characteristics of frost in Liaoning Province in the past 50 years[J]. Meteorology, 2011, 36(11): 38-45.]

[13] 范晓辉, 王麒翔, 王孟本. 山西省近50年无霜期变化特征研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(10): 2393-2397. [Fan Xiaohui, Wang Qixiang, Wang Mengben. Study on the characteristics of the frost-free period in Shanxi Province in the past 50 years[J]. Journal of Eco-Environment, 2010, 19(10): 2393-2397.]

[14] 林婧婧, 郭慧. 1971—2012年平凉市霜冻变化特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2015, 9(3): 57-62. [Lin Jingjing, Guo Hui. Analysis of the characteristics of frost changes in Pingliang from 1971 to 2012[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2015, 9(3): 57-62.]

[15] 徐凤霞, 张珊, 王琪珍, 等. 寿光1961—2015年初、终霜日、无霜期变化特征及对农业的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(1): 112-117. [Xu Fengxia, Zhang Shan, Wang Qizhen, et al. Characteristics of change in first, last-frost day and frost-free season in Shouguang from 1961 to 2105 and its impact on agriculture[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(1): 112-117.]

[16] 陈少勇. 中国西北地区初霜冻的气候变化特征[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 165-172. [Chen Shaoyong. Characteristics of climate change in early frost in northwest China[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 165-172.]

[17] 李硕, 沈彦俊. 气候变暖对西北干旱区农业热量资源变化的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 227-235. [Li Shuo, Shen Yanjun. Impact of climate warming on the change of agricultural thermal resources in the arid regions of northwest China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 227-235.]

[18] 王建勋, 朱晓玲. 近40a新疆阿拉尔垦区初终霜日及无霜期的变化特征[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(9): 183−186. [Wang Jianxun, Zhu Xiaoling. Variation characteristics of dates of first, last frost days and frost-free season in Xinjiang Alar Reclamation Area in the past 40 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2011, 25(9): 183−186.]

[19] 辛渝, 张广兴, 刘兴旺, 等. 1961—2005年新疆博州地区农业热量因子的时空变化[J]. 冰川冻土, 2008, 30(3): 440−451. [Xin Yu, Zhang Guangxing, Liu Xingwang, et al. Temporal and spatial variation of agricultural thermal factors in Bozhou, Xinjiang from 1961 to 2005[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2008, 30(3): 440−451.]

[20] 潘淑坤, 张明军, 汪宝龙, 等. 1960—2011年新疆初终霜日及无霜期的变化特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(4): 735−742. [Pan Shukun, Zhang Mingjun, Wang Baolong, et al. Variation characteristics of frost days and frost-free season in Xinjiang from 1960 to 2011[J]. Arid Zone Research, 2013, 30(4): 735−742.]

[21] 瀛云萍. 自然历——对现行历法改革的设想[J]. 辽宁师范大学学报, 2004(4): 118−123. [Ying Yunping. Natural calendar: Conception of reforming current calendar[J]. Journal of Liaoning Normal University, 2004(4): 118−123.]

[22] 符淙斌, 王强. 候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学, 1992, 16(4): 482−493. [Fu Yanbin, Wang Qiang. Definition and detection method of abrupt climate change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992, 16(4): 482−493.]

[23] 刘永伟, 闫庆武, 黄杰, 等. 于GIS的中国API指数时空分布规律研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(8): 1386−1394. [Liu Yongwei, Yan Qingwu, Huang Jie, et al. Study on the spatiotemporal distribution of API index in China based on GIS[J]. Journal of Ecology and Environment, 2013, 22(8): 1386−1394.]

[24] 许艳, 王国复, 王盘兴, 等. 近50年中国霜期的变化特征分析[J]. 气象科学, 2009, 29(8): 427−433. [Xu Yan, Wang Guofu, Wang Panxing, et al. Analysis of the characteristics of frost season in China during the past 50 years[J]. Chinese Journal of Meteorology, 2009, 29(8): 427−433.]

[25] 王国复, 许艳, 朱燕君, 等. 近50年我国霜期的时空分布及变化趋势分析[J]. 气象, 2009, 35(7): 61−67. [Wang Guofu, Xu Yan, Zhu Yanjun, et al. Analysis of the spatiotemporal distribution and change trend of frost in China in the past 50 years[J]. Journal of Meteorology, 2009, 35(7): 61−67.]

[26] 张音, 古丽贤·吐尔逊拜, 苏里坦, 等. 近60 a来新疆不同海拔气候变化的时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(4): 822−829. [Zhang Yin, Gu Lixian Turxunbai, Su Litan, et al. Analysis of the spatiotemporal characteristics of climate change at different altitudes in Xinjiang in the past 60 years[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(4): 822−829.]

Temporal and spatial variation characteristics of first and last frost day and frost period from 1961 to 2017 in northern Xinjiang

ZHANG Xin[1], LOU Junwei[2], WANG Yong[3], WANG Zhikai[4]

(1. Mosuowan Bay Weather Station, Meteorological Bureau of Shihezi, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. Meteorological Bureau of Wuyi County, Jinhua 321200, Zhejiang, China; 3. Xinjiang Ecological Meteorology and Satellite Remote Sensing Center, Urumqi 830000, Xinjiang, China; 4. Meteorological Bureau of Deyang City, Deyang 618000, Sichuan, China)

Abstract: This study analyzes the temporal and spatial evolution characteristics of the first, last frost dates, and frost season in northern Xinjiang, China using the daily minimum temperature observation data from 37 surface weather stations in northern Xinjiang (1961—2017) and conventional meteorological statistical methods. The results showed that (1) the average first frost day in northern Xinjiang is delayed at a rate of 2.2 $d\cdot(10a)^{-1}$. The average last frost day is advanced at a rate of 1.7 $d\cdot(10a)^{-1}$. The average frost season is shortened at a rate of 3.9 $d\cdot(10a)^{-1}$. The principal change cycle in the first, last frost day, and frost period is approximately two years. (2) The regions with a larger frost shortening trend in northern Xinjiang could better correspond to the delayed first frost day and early final frost day. The shortening trend of the frost season is most significant in the Ili Prefecture, Tacheng Prefecture, and the northeastern part of the east Tianshan Mountain. The narrow region extending from Bortala Mongol Autonomous Prefecture to the northern slope of the Tianshan Mountain has a moderate shortening trend, and the Altay Prefecture has the weakest. (3) The variation trend of the first frost day in most areas of northern Xinjiang correlates well with altitude. The delaying rate of the first frost day decreases as altitude increases, with a vertical changing rate of -0.077 $d\cdot(a\cdot km)^{-1}$. The warming of autumn is the principal reason for the delay of the first frost day. Spring and autumn warming both affect the shortening of the frost season, but the impact of autumn is greater.

Key words: first/last frost date; frost period; temporal and spatial variation; northern Xinjiang